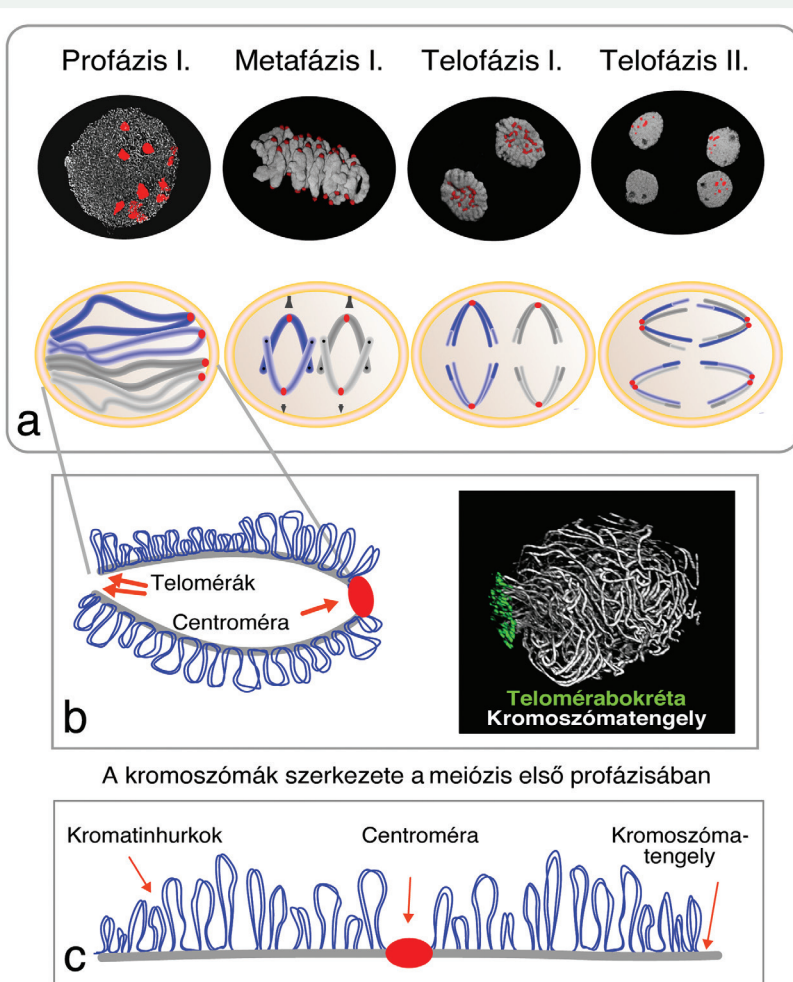


# HÁZASODIK A BÚZA, ÁRPA FIÁT KÉRI

A párválasztás életünk egyik legfontosabb döntése. Míg a hagyományos társadalomban évszázadokon át sokszínű etikettváltozatok szerint, szigorú szociális szabályokat betartva közeledhettek egymáshoz a párok, ma már a közösségi média bővületében és révén sabado(sa)n zajlik az ismerkedés. Akár régen, akár ma, a megfelelő partner kiválasztásához többnyire rögs út vezet, amelynek során a mindenkori társadalmi normákat szokás egyeztetni. Nos, ugyanilyen szabályozott módon történik meg a legtöbb élő szervezet speciális sejtjeiben a kromoszómák egymásra találása is! Ahogyan egy párkapcsolat stabilitása meghatározza a gyermekek életminőségét, hasonlóan fontos szerepe van a kromoszómák pontos párosodásának az ivarsejtek életképességében. (A cím parafrázis a *Házasodik a tücsök...* kezdetű magyar népdal – Bartók Béla Tolna vármegyei gyűjtése, 1907 – első sorára. A szerk.)



Öröklött tulajdonságainkat génállományunk, a genom határozza meg, amely a sejtek osztódása során hosszú fonalakba, kromoszómákba szerveződik a sejtben. Génjeink egyik felét édesanyánktól, másik felét édesapánktól öröklöttük: ez a két génhalmaz együtt alakítja ki tulajdonságainkat és szabályozza életfolyamatainkat. Örökítőanyagunk továbbadása gyermekeinknek egy összetett biológiai folyamatban valósul meg. Saját kromoszómaállományunknak pontosan a felét továbbítjuk, a másik felét a párunktól kapják gyermekeink. Ehhez ivarsejtjeink kialakulása során az örökítőanyagunkat meg kell feleznünk egy különleges, számfelező sejtosztódás, a *meiózis* (1a. ábra) révén, miközben a bennünk levő apai és anyai (tehát a gyermek szempontjából nagyszülői) kromoszómák egyes szakaszait kicserélik egymással, amit

◀ 1. ábra. A számfelező, meiotikus sejtosztódás főbb fázisai mikroszkóppal és sematikusan (a, piros pontok=centromérák), a kromoszómahurkok alakja sematikusan és konfokális lézermikroszkóppal (b) és egy párosodásra kész meiotikus kromoszóma sematikusan finomszerkezete (c)

(FORRÁS: SEPSI ÉS SCHWARZACHER 2020. J. CELL SCI. 133: JCS243667)

.meiotikus rekombinációnak nevezzük. Ez az egyszerűnek tűnő jelenség bonyolult szabályozás alatt megy végbe, és az élet fennmaradásának egyik legfontosabb alapfeltételét, a környezeti alkalmazkodáshoz elengedhetetlen genetikai sokféleséget biztosítja.

### Az egymásratalálás bonyodalmai

Ahhoz, hogy a megfelelő kromoszómáriszkek között jöjjön létre a meiotikus rekombináció, az egymással csaknem azonos (homológ) apai és anyai kromoszómapárok megkeresik egymást, és szorosan összekapcsolódnak,

«A gabona régen az élet jelképe volt, a nép egyszerűen csak életnek nevezte.

Hagyományosan Luca-napkor csíráztatták a lucabúzákat, azaz az új életet.

(POLGÁRI DÁVID FELVÉTELE)

szinapszist alkotnak. A kromoszómapárok kölcsönös felismerését, majd az azt követő rekombinációt úgy lehet elképzelni, mint egy kártyajátékot, amelyben egyenlő számú nő és férfi vesz részt. Minden nő kap egy lapot, amelynek a párja valamelyik férfinál van, a feladat pedig az, hogy a kártyákat tartó férfiak és nők minél rövidebb idő alatt megtalálják a párjukat, akivel kicserélik a kártyájukat.

Ha a homológ kromoszómapárok nem találják meg egymást vagy nem összeillő kromoszómák rekombinálódnak, az az adott kromoszóma elvesztését jelenti, illetve genetikai rendellenességeket, aberrációkat okoz. A kromoszómák kiesése és átépülése a genom egységének felbomlásához és végzős soron működésképtelen ivarsejtek kialakulásához vezet. A már rendelkezésünkre álló jelentős tudás ellenére ma is a biológia egyik legfontosabb kérdése az, hogy az összetett kromoszómakészletben milyen módon találják meg a kromoszómapárok egymást.

### A hűséges kapcsolatok fennmaradnak

Az Eötvös Loránd Kutatóhálózat Agrártudományi Kutatóközpontja martonvásári Mezőgazdasági Intézetében működő Növényi Sejtbiológia Osztály búzával foglalkozó kutatócsoportjának – Sepsi Adél, Mihók Edit, Makai Diána, Lenyko-Thege Andrea, Polgári Dávid és Sági László – legfrissebb eredményeit

is közölte nemrég egy áttekintés a *Journal of Cell Science* folyóiratban. A tudományos cikkben saját eredményeinket és mások kutatásait elemmezve arra hívtuk fel a figyelmet, hogy a növényi sejtmagon belül a meiotikus kromoszómák programozott változása és térbeli rögzítése egyfajta mechanikai szabályozóként működik.

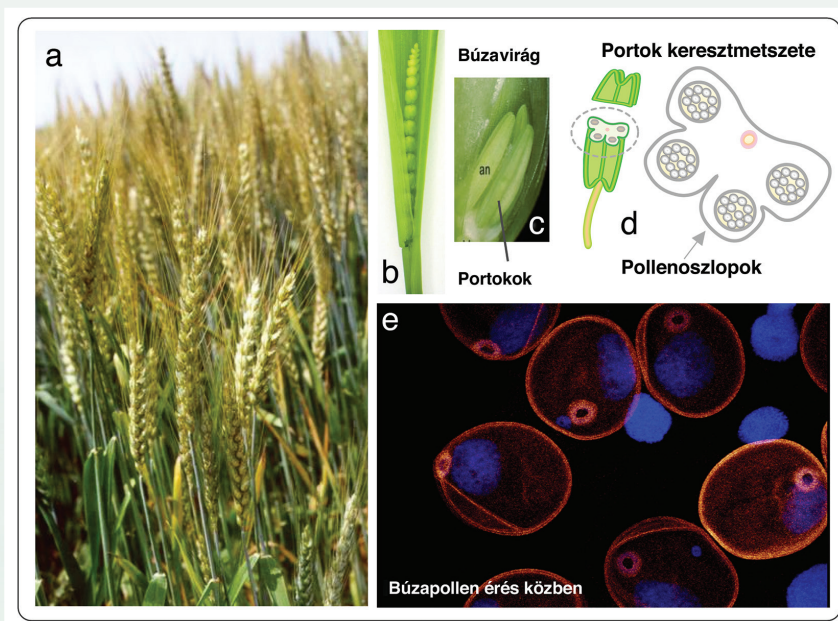
A rendkívül nagy és összetett genommal rendelkező kenyérbúza meiotikus sejtosztódásának vizsgálatára a hímnivarú szaporítószerv, a portok a legalkalmasabb az osztódó sejtek nagy száma miatt. A meiózis a kenyérbúza kalászainak (2a. ábra) virágkezdeményeiben megy végbe, amelyek a fiatal, még a levélhüvelyben növekvő kalászokban (2b. ábra) helyezkednek el. A virágok portokjaiban (2c–d. ábra) levő nagyszámú mikrospóra-anyasejt számfelvező osztódása révén jönnek létre, majd indulnak érésnek a mikrospórák, azaz a fiatal pollensejtek (2e. ábra), amelyekből azután kifejlődik az érett virágpor.

A vizsgálatok szerint a hosszanti kromoszómák az osztódás előkészületei során hurkokat formálva, a sejtmag hártájához belülről kipányvázva helyezkednek el úgy, hogy a két végük egyazon pontban rögzül. Ezt az elrendeződést kromoszómabokrétának

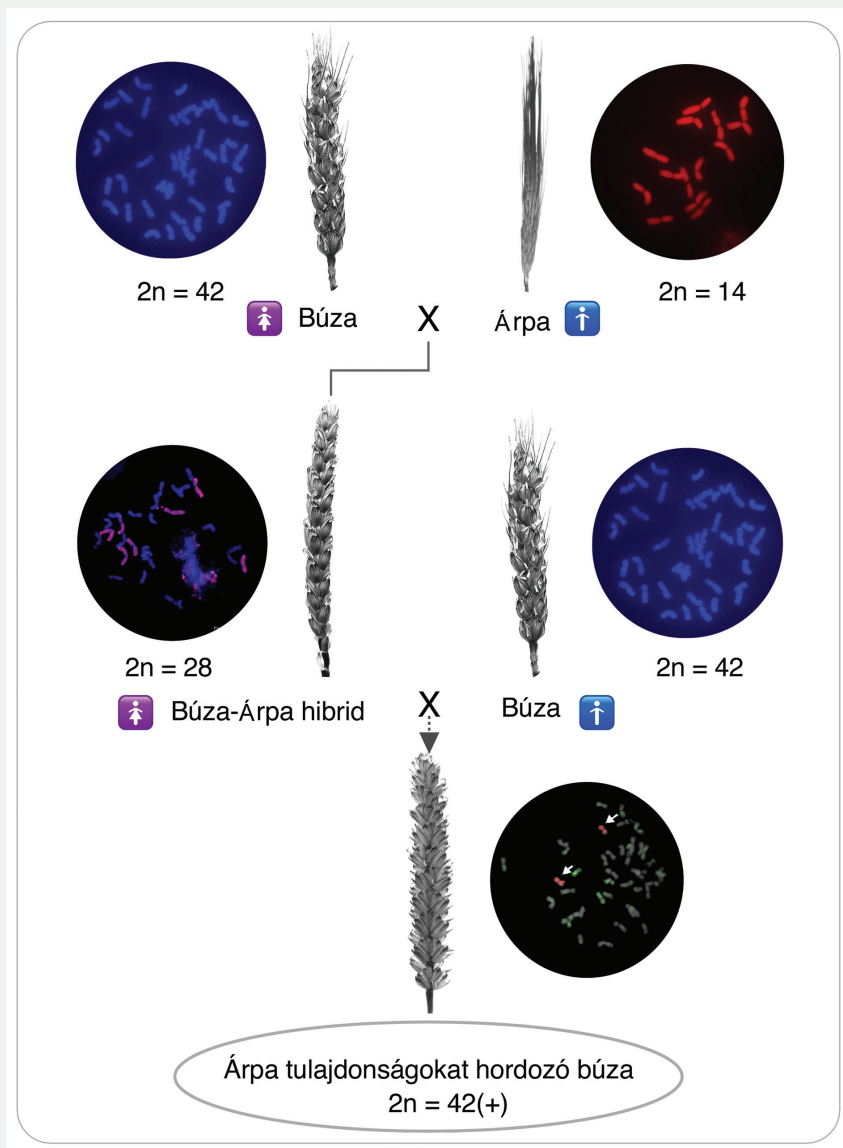
nevezzük, mert a kromoszómák csoportosulása a mikroszkóp alatt egy virágcsokorhoz hasonló (1b. ábra). Magukon a kromoszómákon belül az örökítőanyag szintén apró (100–150 nanométer széles) hurkokat formázva kapcsolódik egy fehérjéből felépülő tengelyhez (1c. ábra). Felfedeztük, hogy az osztódás korai szakaszában nemcsak a kromoszómavégek, a telomérák, hanem a kromoszómák középső részén levő befűződések, a centromérák is a sejtmaghártához kapcsolódnak.

Amint a kromoszómavégek megtalálják egymást és kapcsolatot, szinapszist képeznek, a centromerikus régiók leválnak a sejtmaghártya belső felszínéről, majd a kromoszómahurkok a sejtmag belseje felé vándorolnak. A centromérák leválása a sejtmag belső oldaláról az eredeti kifeszített állapot helyett egy nagyobb mozgásterű, laza állapotot biztosít a kromoszómahurkoknak. Az egyes szülői homológ kromoszómák ebben a laza állapotban találják meg egymást a közöttük levő hasonlóság mértéke alapján. Minél inkább hasonló két kromoszóma, annál több kapcsolat jön létre közöttük. Részleges hasonlóság esetén még a nem valódi párok között is kialakulhatnak kapcsolatok, amelyek együtt járnak egy programozott, rendkívül dinamikus kromoszómamozgással. Ez a sejtmagon belül kialakult

2. ábra. A kenyérbúza meiózis vizsgálatának színtere. A búzakaralások (a) éretlen példányokban (b) fejlődő portokokban (c–d, an=antéra, portok) található mikrospórák (e) anyasejtjeiben zajlik le a meiózis (ld. 1. ábra).







3. ábra. Kevert genomú búza-árpa hibridek előállításának menete. A 42 kromoszómás (kék) kenyérbúza megtermékenyítése a 14 kromoszómás (piros) árpával (felső sor) egy 28 kromoszómás elsődleges hibridet eredményez. Mivel ez a hibrid steril (magot nem hoz), ezért búzával többször visszakeresztelve (középső sor) végeredményben árpa kromoszómákat vagy kromoszóma darabokat (nyilakkal jelölve) tartalmazó búza jön létre (alsó sor).

intenzív kromoszómamozgás „minőségellenőri” funkciót lát el, mert a helytelen kapcsolatok így könnyebben felbomlanak, míg az erősebb, több ponton megkötött „hűségese” kromoszómakapcsolatok fennmaradnak.

Az itt leírt modellből következik, hogy minél kisebb mértékű a rokonság a szülők között, annál nehezebben zajlik a kromoszómapárok közti párosodás, továbbá annál kevesebb kapcsolat – és így rekombináció – jön létre közöttük. Ennek jelentősége a távoli (vagy „idegen fajú”) keresztezések során nő meg.

### Árpa fiát kéri...

Az ivaros keresztezéssel előállítható távoli hibridek „belépő” szintjét a fajhibridek jelentik. Tudatosan első ízben egy Thomas Fairchild nevű londoni kertész hozott létre interspecifikus hibridet 1717-ben, amikor két szegfűfélért sikeresen keresztezett egymással: kísérleti alanyai közül a pollenadó a törökseggfű (*Dianthus barbatus*), az anyja pedig a kerti szegfű (*Dianthus caryophyllus*) volt. A következő, egyúttal jelenleg a keresztezési csúcshintet a nemzetséghibridek alkotják, amelyek száma érthető módon jóval kevésebb. Ezek közül időrendben az első és a termesztésben is – mindmáig

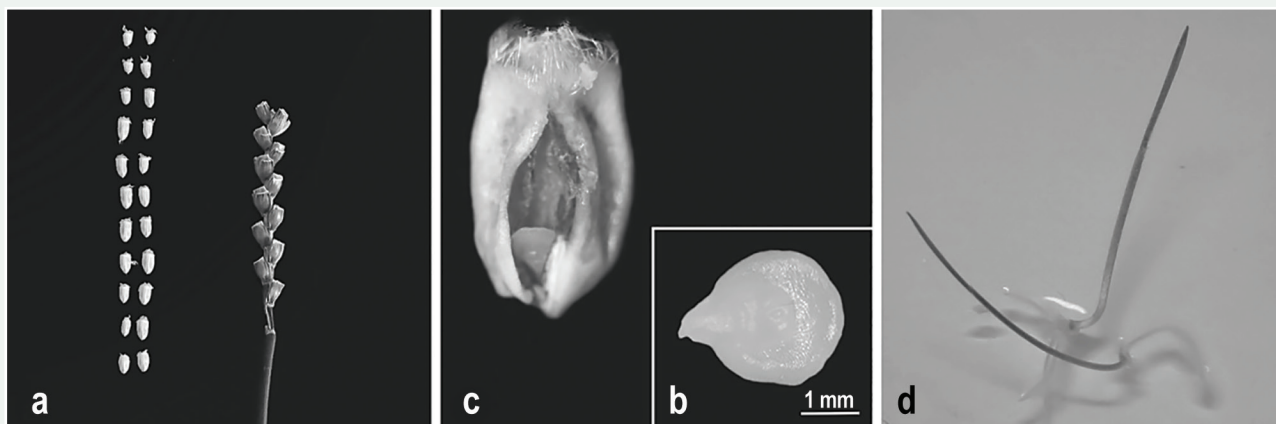
szinte egyedül – sikeresnek bizonyult kombináció a kenyérbúza és a természetes rosz intergenerikus hibridje, a tritikálé lett, amelyet igazolható módon először a német Wilhelm Rimpau hozott létre 1888-ban. A tritikálénak a világon első, államilag elismert és termesztett fajtái Magyarországhoz és Kiss Árpád nevéhez fűződnek 1968-ból, utóbbi egyúttal a modern tritikálénemesítés alapjait is lerakta.

A növénygenetikuskok és -nemesítők régi álma, hogy a mérsékelt égöv két legjelentősebb gabonaféléjének, a búzának és az árpának több évezred során kiválogatott előnyös tulajdonságait egy „szupergabonában” egyesítsék, a mai napig is csak álom maradt. Az 1970-es évek kezdeti sikerei után nagyjából egy évtizedig tartott annak felismerése, hogy a keresztezés két lehetséges iránya közül az árpa ♀ × búza ♂ aligha járható, mert a sorozatos búza-visszakeresztések nagyfokú (hím)sterilitást eredményeztek. Ez a zsákutca azonban csak tetézte azt a jelenleg is megoldatlan nehézséget, hogy egyik keresztezési irányban sem sikerült az elsődleges (F1) teljes hibridek életképes utódait létrehozni. Ennek oka abban rejlik, hogy a hibridben található búza és árpa szülői kromoszómák nem tudnak egymással elég stabilan párosodni és életképes ivarsejteket létrehozni. Ennek hiányában pedig csak a búza-szülővel ismételtelen visszakeresztelve lehet elérni az árpagenom egy részének átvitelét (3. ábra).

A vázolt nehézségek közös gyökere még a keresztezések során kapott hibrid embriók és a belőlük regenerált növények alacsony gyakorisága, ami a megporzott virágok számára vetítve általában nem haladja meg az 1-2 százalékot. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy 100 elsődleges hibrid növény létrehozásához mintegy 500 kalászt (azaz 10 000 virágot) kell kasztrálni és kézzel megporozni. Jól látható, hogy a keresztezések határfokának, eredményességének jelentős növelése az egyik legfontosabb feladat.

Korábbi megfigyelések alapján a búza keresztezhetősége az árpával, illetve rozssal elég jó egyezést mutat egymással. Elgondolásunk szerint ezért újabb, a rozssal „már bevált”, jól kereszteződő búzafajták bevonásával a búza × árpa hibrid létrehozásának határfoka jó eséllyel jelentősen javítható. Néhány





4. ábra. Búza × árpa hibridek előállítása. Megduzzadt és termékenyült szemek egy kézzel megporzott búzakaralásban (a), tápszövet (endospermium) nélkül kifejlődött 14 napos hibrid embrió (b) egy felnyitott szemben (c), steril táptalajon *in vitro* csírázó hibrid hajtások (d)

(FORRÁS: POLGÁRI ÉS MUNKATÁRSAI 2014. PLANT CELL REP. 33: 1323)

ígéretes tavaszi búza tesztelésével azonosítottuk a martonvásári génbank 'Szecsuan' nevű fajtáját, amely rozssal és árpával egyaránt kiváló keresztezési reakciót mutatott. Erre alapozva dolgoztuk ki módszerünket (4. ábra), amellyel sikerült a búza × árpa hibrid növénykihozatalt 10 százalék fölé emelni, és azt több éven át reprodukálni. Ezzel a módszer hatásfoka tehát többszörösen meghaladja a szakirodalomban általánosan közölt 1-2 százalékos értéket, és megfelelő ráfordítással már a gyakorlati célú alkalmazás is elérhető közelségbe kerül.

### Jó az idegen a háznál

A kenyérbúza termesztését súlyos kihívások elé állítja az éghajlati változások okozta szélsőséges időjárás. A Föld népességének további robbanásszerű növekedése megköveteli a búzatermesztés jelentős növelését, ha el akarjuk kerülni az éhínséget és az ezzel járó migrációt bolygónk fejletlen térségeiben. Mivel a búza termésmennyisége a hagyományos nemesítési módszerekkel nem emelhető a kívánt ütemben, így új technikák és stratégiák kidolgozására és alkalmazására van szükség.

Olyan eszközöket kell a ma tudósainak a nemesítők kezébe adniuk, amelyekkel új tulajdonságkombinációkat nagyon nagy számban tudnak kialakítani. Mert nagyszámú új növény közül nagyobb esély lesz olyan egyedek kiválogatására, amelyek a kedvezőtlen éghajlati viszonyokhoz is képesek jól alkalmazkodni.

Az *előnemesítési* programok során a búzát a rokon fajok erősebb ellenálló képességével vértetik fel. Ezt természetes keresztezésekkel érik el, amelyek során a búzát anyai szülőként, míg az árpát vagy más távolról rokon faj növényeit (például tarackbúza, kecskebúza) apai szülőként használják. Bár a hibrid növények utódainak nagy része életképtelen, kevés számban azért találni olyan utódokat, amelyek búzával visszakeresztezhetők. Az így létrejött növények hordozni fogják az idegen fajtából származó előnyös tulajdonságokat. Az idegen kromoszómák könnyen kiesnek a meiotikus sejtosztódás során, azonban,

ha előtte rekombinálódnak a búza kromoszómaival, *transzlokációk* vagy „átépült” kromoszómák jönnek létre. Az átépült kromoszómák nagy része azután már megbízhatóan öröklődik a következő nemzedékekre: miközben a rokon fajok ellenállóságát hordozza, a búza termésmennyiségét is képes produkálni. A búza és az „idegen fajú” kromoszómák cseréi szabálytalanok (illegitimek), mert nem az azonos fajú szülők kromoszómái közti normális párosodás módján jönnek létre. Előfordulásuk így meglehetősen ritka, ami korlátozza az előnemesítési programok sikerét, mert sok-sok év és munka befektetésével érhető el a megfelelő számú kromoszómaátépülés. Éppen ezért rendkívül fontos a meiotikus rekombináció gyakoriságának növelése, meghatározva ezzel az előnemesítési programok sikerét.

Az idegen fajú, távoli keresztezések, így a búza × árpa hibridek létrehozásának első ellentmondása, hogy a szélesebb genetikai bázison nyugvó kedvező tulajdonságok nem aknázhatók ki elég hatékonyan a szülői kromoszómák közti párosodás és rekombináció hiánya miatt. Munkánk célja ennek az ellentmondásnak a feloldása úgy, hogy a rekombinációs gyakoriság megnövelésével az árpa génjei sikeresen áttemelhetők legyenek a búzagenomba. Ennek az eredménynek a feltétele azonban a kromoszómák párosodását irányító, ma még nagyrészt ismeretlen mechanizmusok, azaz a „párválasztási etikettek” egyre pontosabb megismerése és megértése.

SEPSI ADÉL, POLGÁRI DÁVID,  
SÁGI LÁSZLÓ

ELKH Agrártudományi Kutatóközpont,  
Mezőgazdasági Intézet, Martonvásár

Az ismertetett kutatások az NKFIH K 101768 és FK 124266 számú pályázata, az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-5 számú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatása és az MTA KEP-5/2017 számú pályázata, valamint a Sepsí Adél részére nyújtott Bolyai János Kutatási Ösztöndíja révén valósultak meg.

(SEPSI ADÉL  
FELVÉTELE)